doi:10.13866/j.azr.2019.01.03

亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征①

孙从建, 张子宇, 陈 伟, 李 伟, 陈若霞
(山西师范大学地理科学学院,山西 临汾 041000)

摘 要: 为了揭示中亚高山地区大气降水稳定同位素的时空分布特征,开展不同尺度下干旱区水文循环的研究,分析了亚洲中部天山、昆仑山、祁连山地区18个站点的降水氢氧稳定同位素资料。结果表明:天山、昆仑山和祁连山地区降水稳定同位素季节变化较为明显,表现出夏半年高、冬半年低的变化趋势。3个地区降水稳定同位素的空间分布也呈现出显著的季节差异。除昆仑山外,天山和祁连山大气降水线方程的斜率均低于全球大气降水线,说明这些地区的降水受到较强的蒸发影响。研究区各站点降水稳定同位素均呈显著的温度效应,区域内降水量效应不明显。春、夏季昆仑山地区3站点的降水 $\delta^{18}O$ 高程效应较明显,降水 $\delta^{18}O$ 随海拔上升而降低,其余地区没有明显的高程效应。除昆仑山地区西合休外,亚洲高山地区氘盈余(d值)总体表现出冬半年高,夏半年低的变化趋势。

关键词: 高山; 降水; 稳定同位素; 时空分布; 亚洲中部

大气降水作为水循环的输入项,是陆地水资源的根本来源。水资源作为人类赖以生存和发展的基本条件,影响和制约着区域生态环境保护和经济社会发展。大气降水稳定同位素受纬度效应、海拔效应、降水量效应、温度效应、水汽来源、降水二次蒸发等因素影响,其组成能有效指示地区气候,同时也是认识环境变化、古气候重建等的重要信息[1-3],已经成为定量研究水循环过程的重要手段。

亚洲中部高山区地势较高,积雪、冰川广布,孕育了塔里木河、黑河、伊犁河、印度河等亚洲的重要河流,是亚洲重要的水源区,对于亚洲生态环境和人口经济发展起着重要的作用,被称为亚洲水塔。亚洲中部高山地区距海较远,山地气候复杂[2,4],区域水循环过程复杂多变,生态脆弱,是全球气候变化最为敏感的地区之一[5-7]。近年来,随着人类活动的加强及气候变化的加剧,中亚水资源短缺问题越来越受到广泛的关注[8-9],而作为水资源原始补给的降水已经成为地理工作者的关注焦点。

水文循环及水资源变化与气候条件联系密切。过去几十年,在气候变化背景下,中亚高山地区降水呈现波动增加[10],降水过程的改变可能对区域环境产生显著影响[11],也势必会引起降水稳定同位素的变化[12]。而作为水循环过程、大气环流模式和水汽来源的重要研究工具,降水氢氧稳定同位素组成及其时空分布的研究将为区域水资源的合理利用提供帮助[13]。笔者选取亚洲中部天山、祁连山及昆仑山等地作为研究区,基于长期的降水氢氧稳定同位素观测及文献资料,分析了亚洲中部高山地区降水稳定同位素的时空分布特征,探讨了影响该地区降水稳定同位素变化的主要因素。该研究将进一步增加对亚洲中部高山地区降水稳定同位素时空分布及水循环特征的认识。

1 研究区概况

研究区位于亚洲中部的天山、昆仑山和祁连山(图1)。天山是世界上唯一由巨大沙漠夹持的一条中亚大山脉,东西长2 500 km,平均海拔约4 000 m,降水量迎风坡(北坡)多于背风坡(南坡),也是世界上距离海洋最远的山系[14]。昆仑山西起帕米尔高原,全长2 500 km,平均海拔5 500 ~6 000 m,西部年降水量约为60 mm,东部20 mm,雪线(5 600 ~5 900 m)以上为冰川覆盖区,雪冰融水是河流的主要补给来源。祁连山位于青藏高原东北边缘,东西长800 km,东起乌鞘岭,海拔4 000 ~6 000 m,其年降水量由南坡700 mm降到北坡400 mm。祁连山冰川广布,极高山上的雪冰融水及降水养育了疏勒河、石羊河及黑河[15]。研究区所在的天山、昆仑山

① 收稿日期: 2018-05-13; 修订日期: 2018-09-13
基金项目: 荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放基金(G2018-02-06); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2016D01A075)资助
作者简介: 孙从建(1986-),男,博士,副教授,主要从事同位素水文学的研究. E-mail:suncongjian@sina.com

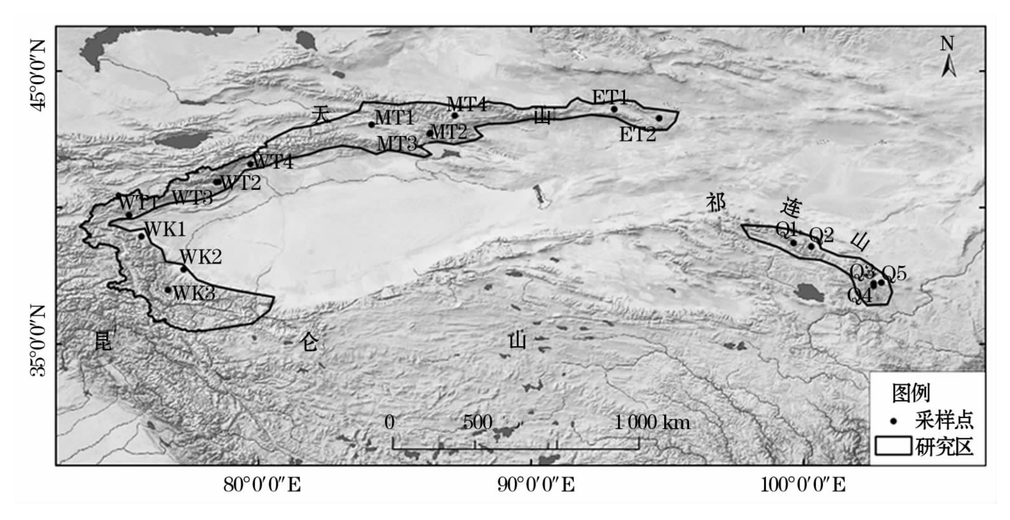


图 1　亚洲中部高山位置与采样点分布

Fig. 1　Geographical location of the alpine zones and the distribution of sampling sites in Central Asia

和祁连山地区人烟稀少,气候变化及水循环受人类干扰较少〔16－17〕。

为了便于本文的讨论和描述,将研究区分为西部天山 WT(West Tianshan)、中天山 MT(Middle Tianshan)、东天山 ET(East Tianshan)、西昆仑山 WK(Western Kunlun)、祁连山 Q(Qilian)。

2　数据来源与分析

选取天山、昆仑山和祁连山地区的 18 个研究站点(表 1)的降水稳定同位素数据。其中实际观测站点包括:天山地区的沙里桂兰克(WT3)、神木园(WT4)、黄水沟(MT3)、乌河英雄桥(MT4),昆仑山地区的沙曼(WK1)、西合休(WK2)、江卡(WK3)等 7 个站点。从文献资料中获取的站点数据包括:天山地区的乌恰(WT1)、阿合奇(WT2)、巴音布鲁克(MT1)、巴仑台(MT2)、巴里坤(ET1)、伊吾(ET2)〔18〕,祁连山地区的野牛沟(Q1)、大野口(Q2)、代乾(Q3)、金强驿(Q4)、安远(Q5)〔19－20〕等

表 1　研究区主要站点的相关信息表

Tab. 1　Information of the sampling sites in the study areas

采样点	海拔 /m	经度 /(°)	纬度 /(°)	样品数量	平均气温 /℃	降水量 /mm	平均相对湿度 /%	$\delta^{18}O$ 年均值 /‰	d-excess 年均值 /‰	研究时段	采样频率	参考文献
乌恰(WT1)	2 176	75.25	39.72	8	7.7	188.7	45	－9.6	14.4	2012－08—2013－09	月降水	〔18〕
阿合奇(WT2)	1 985	78.45	40.93	10	6.8	237.7	52	－8.1	11.2	2012－08—2013－09	月降水	〔18〕
沙里桂兰克(WT3)	2 005	78.54	40.94	61	16.70	331.4	–	－11.2	7.2	2012－05—2013－06	次降水	本文
神木园(WT4)	1 730	79.70	41.59	13	8.82	67.4	–	－13.5	5.2	2012－05—2013－06	次降水	本文
巴音布鲁克(MT1)	2 458	84.15	43.03	13	－4.2	208.5	70	－14.8	14.3	2012－08—2013－09	月降水	〔18〕
巴仑台(MT2)	1 739	86.30	42.73	7	7.0	220.4	42	－9.6	10.3	2012－08—2013－09	月降水	〔18〕
黄水沟(MT3)	2 000	86.28	42.70	27	16.17	115	–	－6.0	6.1	2012－05—2013－06	次降水	本文
乌河英雄桥(MT4)	1 880	87.20	43.37	82	5.75	–	–	－14.7	4.0	2012－05—2013－06	次降水	本文
巴里坤(ET1)	1 677	93.05	43.60	11	2.7	230.5	55	－15.4	9.4	2012－08—2013－09	月降水	〔18〕
伊吾(ET2)	1 729	94.70	43.27	9	4.2	104.4	44	－13.8	10.7	2012－08—2013－09	月降水	〔18〕
沙曼(WK1)	2 004	38.94	75.70	22	11.4	51.6	40.5	－12.1	8.2	2012－07—2013－02	次降水	本文
西合休(WK2)	2 960	36.98	76.68	33	4	30.7	49.2	－13.3	14.4	2012－06—2013－10	次降水	本文
江卡(WK3)	1 507	37.73	77.25	57	11.8	59.5	47.1	－11.1	12.6	2011－07—2013－07	次降水	本文
野牛沟(Q1)	3 320	99.63	38.70	12	－3.1	405.8	57.82	－13.3	19.0	2008－06—2009－06	月降水	〔19〕
大野口(Q2)	2 720	100.28	38.57	47	0.7	–	–	－12.5	14.4	2012－11—2013－12	次降水	〔19〕
代乾(Q3)	3 300	102.57	37.22	112	－0.7	642.3	81	－8.2	16.1	2013－07—2014－06	次降水	〔20〕
金强驿(Q4)	2 800	102.57	37.13	79	4.3	354.1	75	－7.4	11.0	2013－07—2014－06	次降水	〔20〕
安远(Q5)	2 700	102.85	37.25	115	4.9	535.6	74	－8.6	17.8	2013－07—2014－06	次降水	〔20〕

11 个站点。文献资料中采集方法和分析测试法与本文相似，研究时段相近，因此可以用作比较降水同位素的空间差异。样品的收集：降雨样品由雨量筒收集，待降雨结束，将量筒中收集的雨水存入 5 mL 的冻存管中，收集后迅速用 parafilm 封口膜密封冷冻保存。降雪由干净托盘收集后倒入干净的密封袋中，在室温内融化后及时存入 5 mL 冻存管，用 parafilm 封口膜密封冷冻保存。次降水事件的相对湿度和温度由布设于取样站点的 HOBO 自计式温湿度计记录（降水时的相对湿度和温度取降水小时数据的平均值）。所有样品待分析时再由冷冻柜中取出，室温下密封融化。观测期内共收集水样 295 个，文献整理数据 423 个（表 1）。

实测样品的室内分析在中国科学院荒漠与绿洲生态国家重点实验室进行。采用 LWIA-V2（DLT－100）液态氢氧同位素分析仪（Los Gatos Research，美国）进行分析测试，$\delta^{18}O$ 和 $\delta^{18}D$ 的测试精度分别为 0.3‰和 0.1‰。引用文献数据 11 个研究站点中，采样方法与本文相似，除野牛沟水样由 EuroPyr OH－3000 元素分析仪 + Isoprime 质谱仪在线测定，其余站点均采用 LWIA-V2（DLT－100）液态氢氧同位素分析仪进行分析测试。测试精度上，乌恰、阿合奇、巴音布鲁克、巴仑台、巴里坤、伊吾、大野口降水 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{18}D$ 测试精度分别为 ±0.6‰和 ±0.2‰，野牛沟降水 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{18}D$ 的分析误差分别小于 1.0‰和 0.2‰，代乾、金强驿、安远 3 个站降水 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{18}D$ 测试精度分别为 0.5‰和 0.2‰。18 个研究站点的测试结果均以“维也纳平均海洋水”V-SMOW 的千分差表示：

$$\delta(‰) = \frac{R_b - R_j}{R_j} \times 1\,000 \qquad (1)$$

式中：R_b 和 R_j 分别为降水样品和 V-SMOW 中 D/H（$^{18}O/^{16}O$）的比率。同位素氘和 ^{18}O 含量分用 δD 和 $\delta^{18}O$ 表示。

降水中 $\delta^{18}O$ 的加权平均为：

$$\overline{\delta^{18}O} = \sum P_c\,\delta^{18}O_c \Big/ \sum P_c \qquad (2)$$

式中：P_c 和 $\delta^{18}O_c$ 分别为相应的降水量和氧稳定同位素比率。

3 结果分析

3.1 降水中 $\delta^{18}O$ 的季节变化

研究发现，天山、昆仑山和祁连山降水中 $\delta^{18}O$ 呈现明显的季节波动，大致表现出夏半年高、冬半年低的特点（图 2）。西天山中，沙里桂兰克的降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最大，介于 －31.2‰ ~ 0.9‰，5—8 月有升高趋势，8—11 月呈明显下降趋势，最高值与最低值分别出现在 8 月和 11 月。阿合奇降水 $\delta^{18}O$ 变

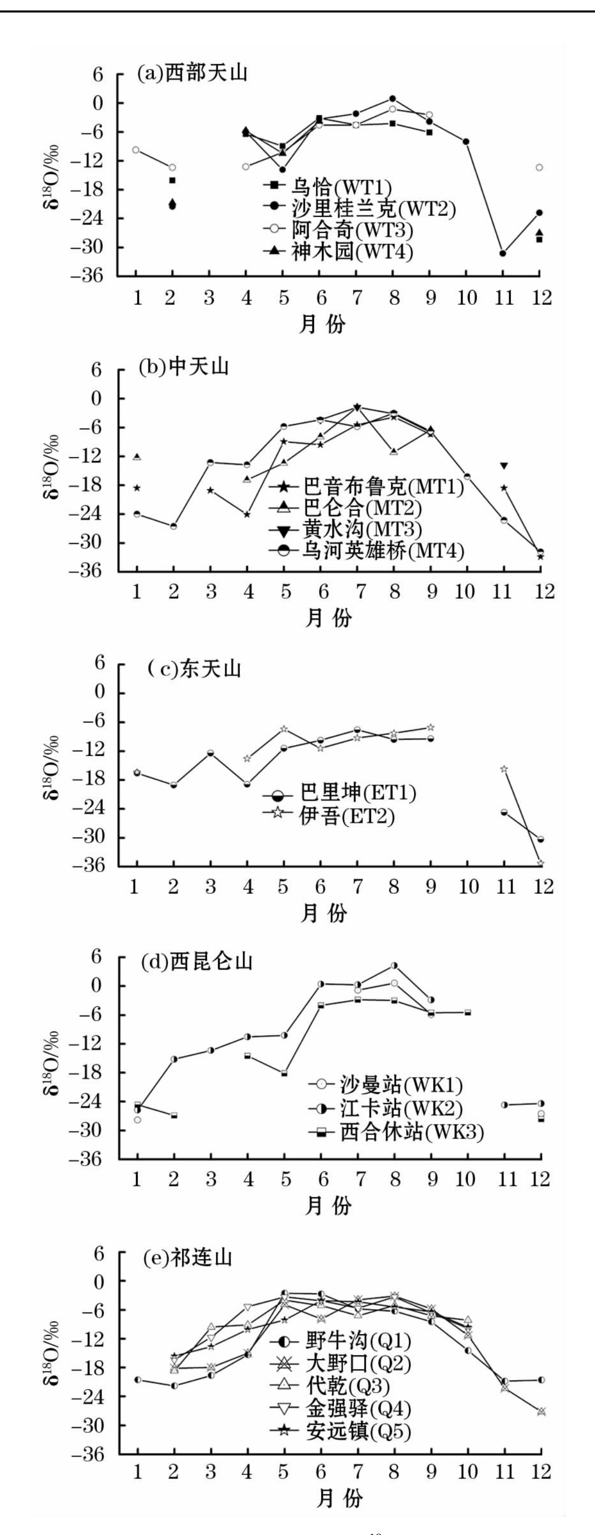


图 2 亚洲中部高山区降水 $\delta^{18}O$ 的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of precipitation $\delta^{18}O$ in the alpine zones in Central Asia

化范围最小,在 -13.4‰ ~ -1.3‰,最高值出现在8月,最低值出现在2月。天山中部,巴音布鲁克的降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最大,介于 -32.9‰ ~ -3.9‰,6—8月呈升高趋势,8—12月呈下降趋势,最高值与最低值分别出现在8月和12月。黄水沟的降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最小,在 -13.8‰ ~ -1.8‰。东天山中,伊吾的降水 $\delta^{18}O$ 变化范围为 -35.4‰ ~ -7.4‰,最高值与最低值分别出现在5月和12月。巴里坤的降水 $\delta^{18}O$ 变化范围为 -30.4‰ ~ -7.6‰,最高值与最低值分别出现在7月和12月。

昆仑山江卡降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最大,介于 -25.7‰ ~ 4.3‰,最高值和最低值分别出现在8月和1月,12月到次年8月有升高趋势,8—11月呈现降低趋势。分析认为江卡在塔克拉玛干沙漠附近降水较少,尤其在夏季温度高、蒸发强烈,降水的蒸发作用加强,使夏季降水稳定同位素富集。昆仑山地区的3个站点中,江卡的 $\delta^{18}O$ 年均值最大,西合休的 $\delta^{18}O$ 年均值最小。

祁连山5个站点降水 $\delta^{18}O$ 均表现出明显的夏半年高、冬半年低的变化趋势,其中大野口降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最大,介于 -27.2‰ ~ -3.2‰,最高值和最低值分别出现在8月和12月。安远镇降水 $\delta^{18}O$ 变化范围最小,在 -15.6‰ ~ -4.1‰,最高值和最低值分别出现在6月和4月。

3.2 降水中 $\delta^{18}O$ 的空间变化

笔者按照山体边缘进行了裁剪,利用 ArcGIS 10.3 进行空间插值,分析了天山、昆仑山和祁连山降水 $\delta^{18}O$ 的空间分布特征(图3)。由图3可知,亚洲高山全年降水 $\delta^{18}O$ 月际变化显著,总体呈现南高北低的空间分布特征。除1月降水 $\delta^{18}O$ 整体较低,时空分布不明显外,其余月份降水 $\delta^{18}O$ 空间分布表现出明显的季节差异。其中,天山地区:2—3月降水 $\delta^{18}O$ 的极低值由西向东逐渐移动;4月极低值在东部聚集,且极低值达到最低;5—6月降水 $\delta^{18}O$ 的极低值由西向东缓慢移动;7—9月极低值均在天山东部;9—10月降水 $\delta^{18}O$ 的极低值由中部向西移动;11月降水 $\delta^{18}O$ 的极高值出现在天山中部;12月降水 $\delta^{18}O$ 的极高值出现在西部,降水 $\delta^{18}O$ 的极低值出现在中东部。昆仑山地区2—3月极低值由北向南逐渐移动,4月降水 $\delta^{18}O$ 整体增高且时空变化不明显,5月降水 $\delta^{18}O$ 急剧降低,6—10月降水 $\delta^{18}O$ 值增高,空间分布特征相似,10月在昆仑山中部达到最高;降水 $\delta^{18}O$ 值在11月降低,12月南高北低。祁连山地区1—2月降水 $\delta^{18}O$ 值增高,3月降水 $\delta^{18}O$

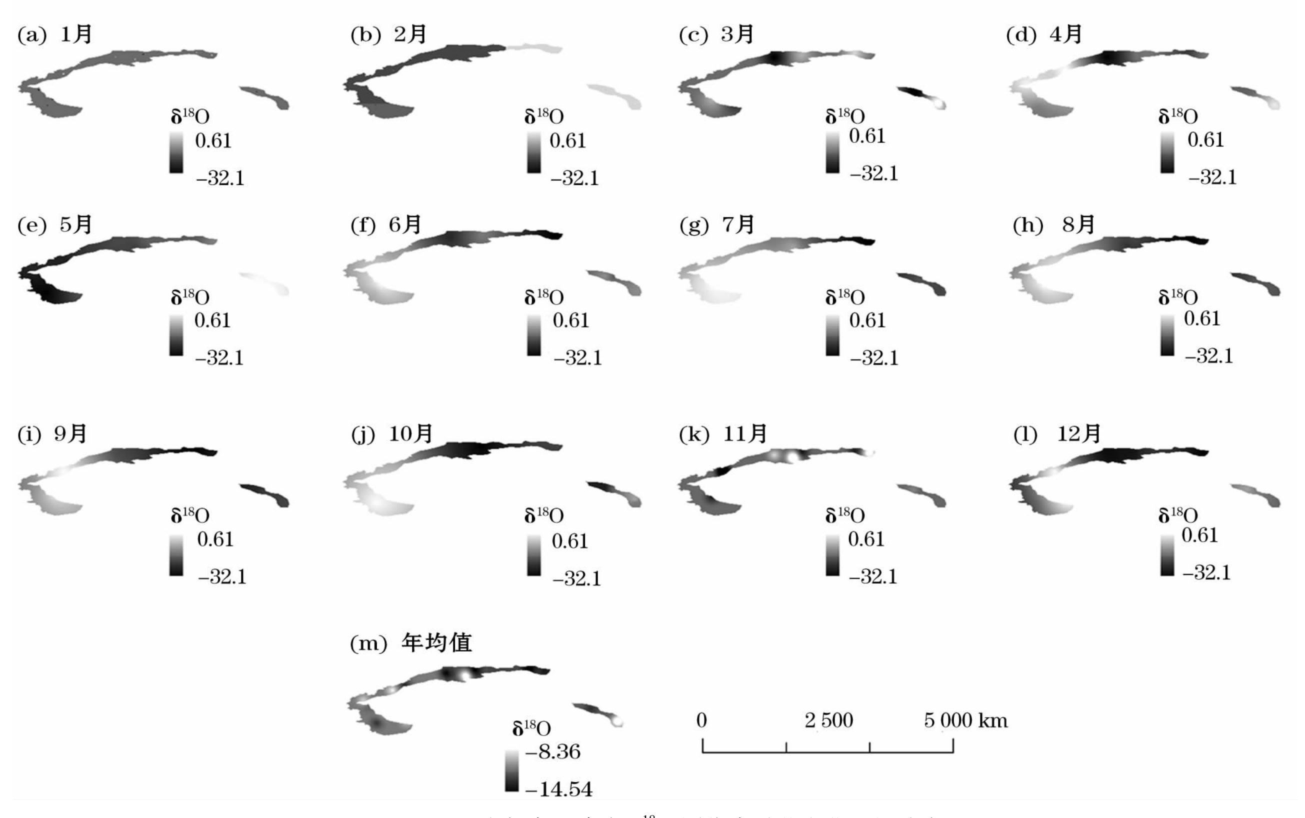


图3 亚洲中部高山降水 $\delta^{18}O$ 同位素季节变化空间分布

Fig. 3 Spatial variation of precipitation $\delta^{18}O$ values in the alpine zones in Central Asia

表现为南高北低的特征,4 月降水 $\delta^{18}O$ 南部降低明显,整体上空间差异较小;5 月降水 $\delta^{18}O$ 整体增高;6—8 月降水 $\delta^{18}O$ 值变化较小;9—10 月降水 $\delta^{18}O$ 极低值由东南向西北移动;11—12 月降水 $\delta^{18}O$ 整体呈现北高南低,且差异不明显。降水 $\delta^{18}O$ 的极大值和最小值,春夏季分别出现在 8 月昆仑山的江卡和中天山的巴音布鲁克,秋冬季分别出现在西天山的阿合奇和东天山的伊吾。

3.3 局地大气降水线

对区域内大气降水中 $\delta^{18}O$ 与 δD 进行一元线性回归分析,拟合得到局地大气降水线(图 4),发现 R^2 值较高,说明 $\delta^{18}O$ 和 δD 的相关性较好。比较发

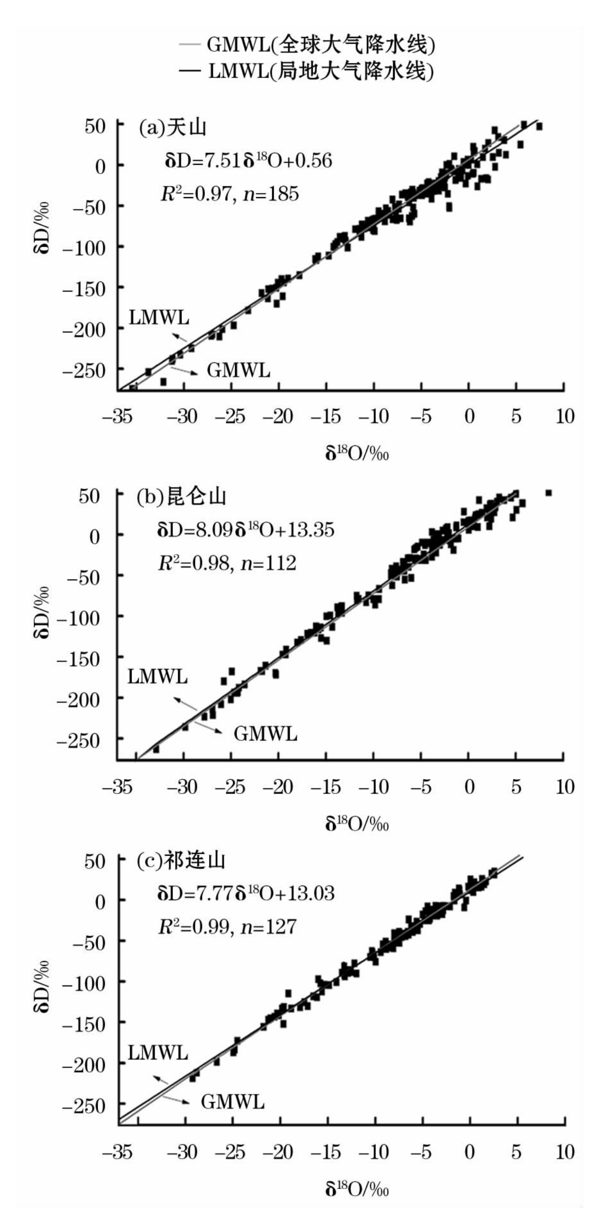


图 4 亚洲中部高山区大气降水线方程

Fig. 4 Line equation precipitation in the alpine zones in Central Asia

现天山地区大气降水线与祁连山地区的大气降水线斜率都小于全球大气降水线:$\delta D = 8\delta^{18}O + 10$[21]。2 个局地降水线显示出较为显著的干旱气候特征,表明 2 个地区降水受到强烈的蒸发影响。而昆仑山地区大气降水线的斜率与截距均大于全球大气降水线,可能该地区临近塔里木盆地,降水受局地蒸发的水汽影响较明显,地表水在强烈蒸发影响下形成的水汽,沿山体上升参与当地降水,使得该区域局地大气降水线方程的斜率和截距偏大。

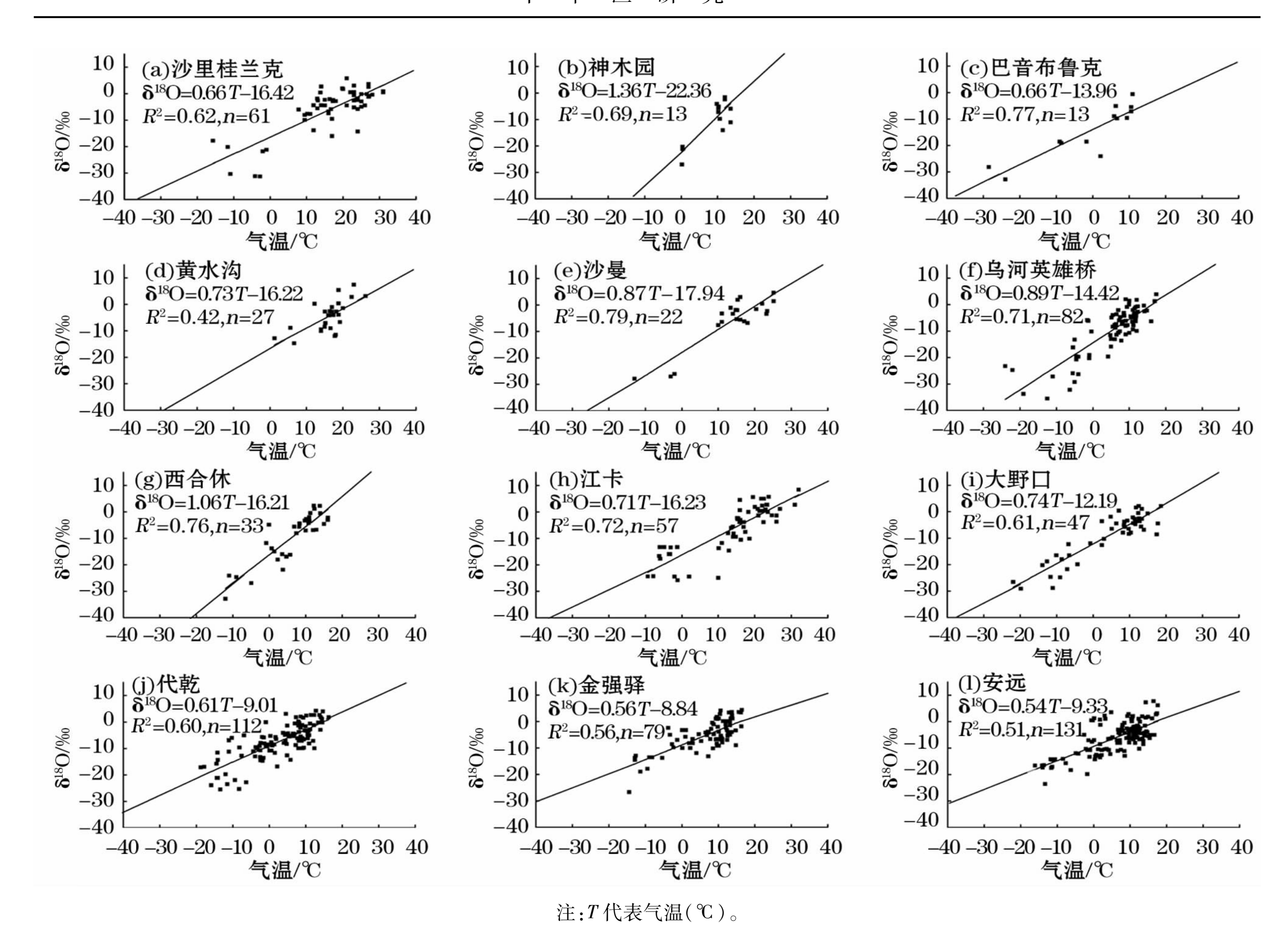
3.4 气温与降水 $\delta^{18}O$ 和过量氘的关系

研究表明大气降水氢氧稳定同位素对气温的变化极为敏感,气温越低,大气降水 $\delta^{18}O$ 值越低;气温升高降水蒸发富集,大气降水中的 $\delta^{18}O$ 值也增大[22]。西北干旱区气温对降水 $\delta^{18}O$ 的组成起主导作用[18]。基于研究区各站点降水 $\delta^{18}O$ 与气温关系的分析(图 5),发现各站点降水 $\delta^{18}O$ 与气温均表现出一定的正相关关系,其中,祁连山地区大野口的降水 $\delta^{18}O$ 受气温的控制最显著,黄水沟受气温效应的影响较小。神木园的斜率最大,安远的斜率最小。

图 6 显示了天山、昆仑山和祁连山地区的 11 个站点气温和 $\delta^{18}O$ 及 d-excess 的关系。发现研究区大部分站点降水 $\delta^{18}O$ 及 d-excess 随气温变化可以分为 3 组。第 1 组是气温在 10 ℃以上,除西合休不明显外,其余降水 $\delta^{18}O$ 随着气温的升高而不断升高,d-excess 不断降低,降水 $\delta^{18}O$ 表现出温度效应,这可能与强烈的云下蒸发导致同位素富集,补偿了水循环造成的同位素消耗,同时高温及较低湿度使 d-excess 降低、同位素升高[15,23]。通过降水 $\delta^{18}O$ 与气温的对比关系发现,在 10 ℃以上,降水 $\delta^{18}O$ 分布点更加密集,温度效应更加明显,说明降水主要发生在高温低湿的夏秋季,较高的气温和较低的饱和水汽压差产生较强的云下蒸发,使过量氘降低,$\delta^{18}O$ 值增加[24]。第 2 组是气温在 0 ~ 10 ℃,降水 $\delta^{18}O$ 和过量氘趋于稳定,$\delta^{18}O$ 和气温没有相关性,在这个气温范围内,水分回收的增加似乎可以补偿云下蒸发,因此可以说是水汽在循环中起主导作用[25-26]。第 3 组是气温低于 0 ℃以下,其 $\delta^{18}O$ 与气温的相关性高于第 2 组,这表明山区地形中上升气团的绝热冷却作用。在气温低于 0 ℃时,在降水的形成过程中动力学同位素分馏占主导[25-28]。

3.5 降水 $\delta^{18}O$ 与降水量的关系

通过对 13 个站点季节尺度降水 $\delta^{18}O$ 与降水量的关系分析,发现研究区所有降水 $\delta^{18}O$ 与降水量的



注:T代表气温(℃)。

图 5 亚洲中部高山地区大气降水的 $\delta^{18}O$ 和气温的关系

Fig. 5 Relationship between precipitation $\delta^{18}O$ value and precipitation in the alpine zones in Central Asia

关系不明显(图 7),其中野牛沟、乌恰、沙里桂兰克、神木园、巴音布鲁克、沙曼、江卡的 $\delta^{18}O$ 与月降水量为低相关关系。亚洲中部高山地区海拔较高、距海洋较远、大陆性气候显著,受西风环流影响较明显;而来自太平洋及印度洋的暖湿气流受高山阻挡难以到达,季风对该区域的影响较弱,可能是这一区域降水量效应不显著的重要原因。一些研究者对我国西北地区的降水 $\delta^{18}O$ 与降水量关系的研究[12,22,29-30]发现,在季节尺度上,降水量效应不太明显,但是次降水尺度上可能存在一定的降水量效应。

3.6 降水 $\delta^{18}O$ 与高程的关系

图 8 为天山、祁连山和昆仑山各站点降水 $\delta^{18}O$ 的年均值随海拔的变化情况。其中昆仑山地区 4 个站点的降水 $\delta^{18}O$ 的年均值都与海拔(h)有一定的负相关关系,其关系式为:$\delta^{18}O = -0.001\ 18h - 9.196\ 71$($R^2=0.59$)。天山、祁连山没有明显受海拔因素的影响。

为了分析次降水事件中降水稳定同位素的高程效应,选取天山地区沙里桂兰克、神木园、黄水沟、乌河英雄桥的同次降水事件(2012 年 6 月 23 日沙里桂兰克、神木园,2012 年 7 月 8 日的沙里桂兰克、黄水沟,2012 年 7 月 22 日的沙里桂兰克、黄水沟、乌河英雄桥,2012 年 8 月 5 日的沙里桂兰克、乌河英雄桥,2012 年 11 月 8 日的黄水沟、乌河英雄桥),评估了次降水 $\delta^{18}O$ 与高程的关系(图 9)。研究发现除 6 月 23 日的一次降水呈现高程效应外,其余几次降水没有明显的高程效应,且有一定的反高程效应。这与孔彦龙在乌鲁木齐河流域的研究较为一致[30]。

3.7 降水过量氘的变化

Rozanski 等[28]研究认为,氘盈余(d)可以反映水汽源形成的水汽平衡条件和热力条件,还可以反映降水形成的气候及地理条件。图 10 反映了研究区各站点降水过量氘的年内变化。除昆仑山地区西合休外,亚洲高山地区降水的氘盈余表现出冬半年高,夏半年低的变化趋势。其中,天山地区沙里桂兰克站 d 值变化范围最大,介于 -14.7‰~21.7‰,平均值为 7.2‰,最高值与最低值分别出现在 10 月和 6 月;神木园 d 值介于 -13.9‰~14.0‰,平均值为

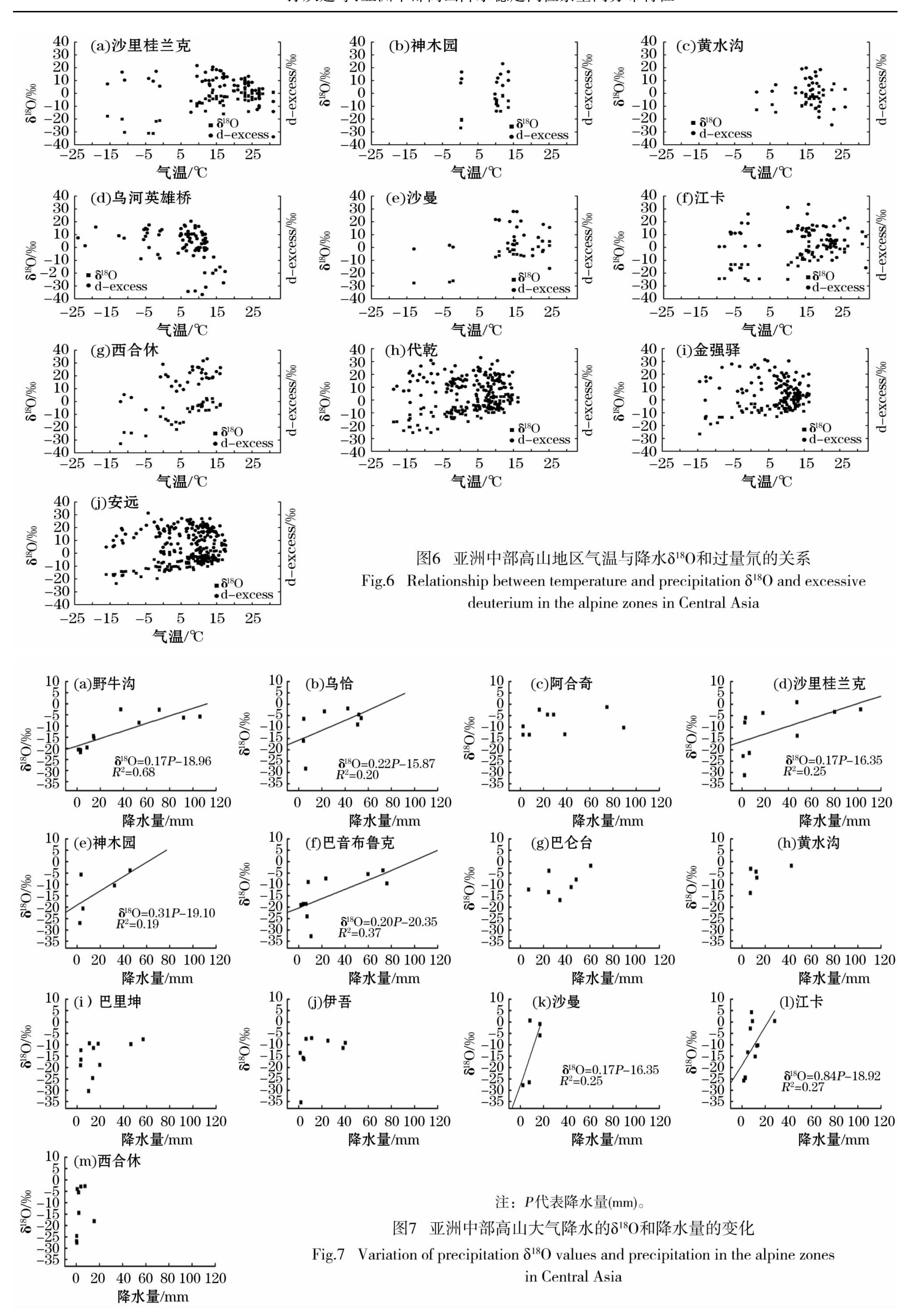


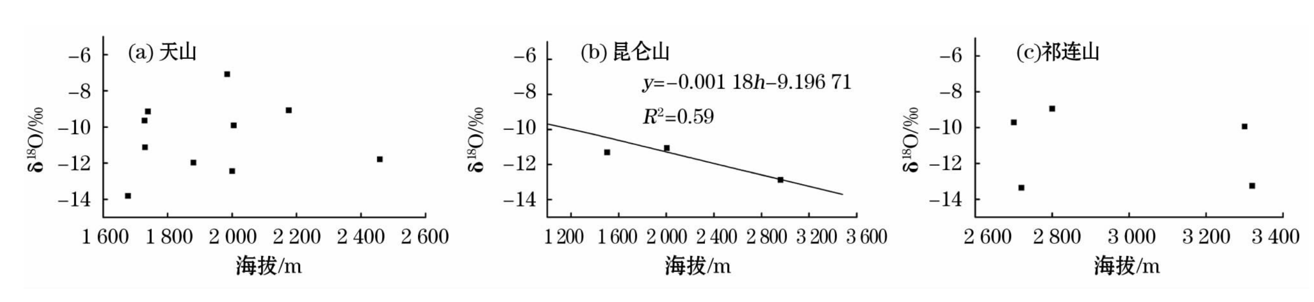
图6 亚洲中部高山地区气温与降水$\delta^{18}O$和过量氘的关系

Fig.6 Relationship between temperature and precipitation $\delta^{18}O$ and excessive deuterium in the alpine zones in Central Asia

注：P代表降水量(mm)。

图7 亚洲中部高山大气降水的$\delta^{18}O$和降水量的变化

Fig.7 Variation of precipitation $\delta^{18}O$ values and precipitation in the alpine zones in Central Asia



注：h 代表海拔(m)。

图 8　亚洲中部高山降水 $\delta^{18}O$ 与海拔关系的季节变化

Fig. 8　Seasonal variation of the relationship between precipitation $\delta^{18}O$ values and altitude in the alpine zones in Central Asia

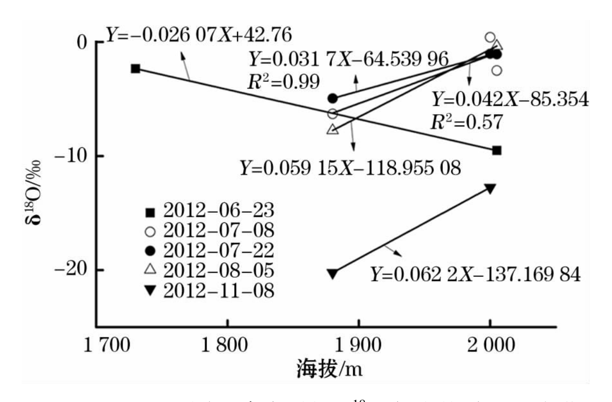


图 9　天山地区同一降水时间 $\delta^{18}O$ 与海拔关系的变化

Fig. 9　Variation of the relationship between precipitation $\delta^{18}O$ values and altitude in the Tianshan Mountains at the same time

5.2‰；黄水沟 d 值介于 -0.6‰～19.8‰，平均值为 6.1‰；乌河英雄桥 d 值介于 -9.0‰～9.2‰，平均值为 4.0‰。天山地区 d 值大多数在全球大部分地区 d 值(10‰)以下，可能因为在降水过程中受到强烈的蒸发，导致 d 值偏小。

昆仑山地区的西合休降水 d 值波动范围最大，介于 -6.5‰～28.1‰，平均值为 14.4‰，最高值与最低值分别出现在 10 月和 2 月；沙曼降水 d 值介于 -1.2‰～22.8‰，平均值为 8.2‰；江卡降水 d 值介于 -0.2‰～26.0‰，平均值为 12.6‰。

祁连山地区的大野口降水 d 值变幅最大，介于 2.3‰～29.5‰，平均值为 14.4‰，最高值与最低值分别出现在 12 月和 5 月；安远镇降水 d 值变幅最小，介于 14.2‰～23.0‰，平均值为 17.8‰，最高值和最低值分别出现在 10 月和 1 月；金强驿降水 d 值介于 4.8‰～24.9‰，平均值为 11.0‰；代乾村降水 d 值介于 11.6‰～23.1‰，平均值为 16.1‰；野牛沟降水 d 值介于 9.8‰～24.2‰，平均值为 19.0‰。

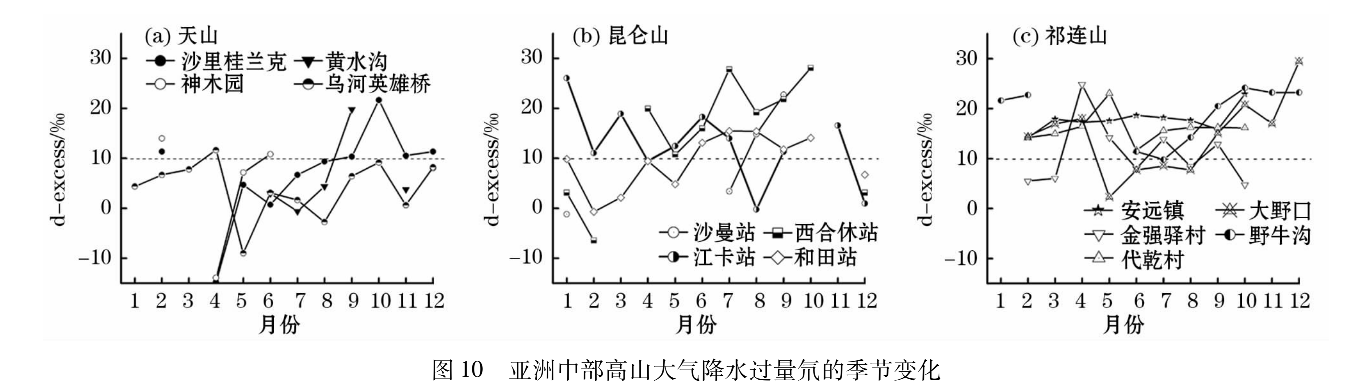


图 10　亚洲中部高山大气降水过量氘的季节变化

Fig. 10　Seasonal variation of excessive precipitation deuterium in the alpine zones in Central Asia

4　结 论

(1) 天山、昆仑山和祁连山 3 个地区降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 年内变化明显，表现出夏半年高、冬半年低的变化趋势，降水 $\delta^{18}O$ 空间分布特征在不同月份呈现不同变化。

(2) 该区除昆仑山降水 $\delta^{18}O$ 的年均值高程效应明显外，天山和祁连山并没有明显的高程效应。且该地区降水量对降水 $\delta^{18}O$ 影响不明显，表明该区降水 $\delta^{18}O$ 主要受控于其他影响因素。

(3) 该区域降水线除昆仑山的斜率稍大于 8 以外，其余站点的斜率均大于全球大气降水线。区降水 d 值波动范围较大，降水过程及水汽来源较复杂。

参考文献(References):

〔1〕 Tian L D,Yao T D,Macclune K,et al. Stable isotopic variations in West China: A consideration of moisture sources〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2007,112(D10).

〔2〕 Liu J R,Song X F,Sun X M,et al. Isotopic composition of precipitation over Arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin〔J〕. Acta Geographica Sinica,2009,19(2):164－174.

〔3〕 Smith K L,Kushner P J. Linear interference and the initiation of extratropical stratosphere-troposphere interactions〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2012,117(D13):13 107.

〔4〕 李小飞,张明军,李亚举,等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征及其水汽输送〔J〕. 环境科学,2012,33(3):711－719.〔Li Xiaofei,Zhang Mingjun,Li Yaju,et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China〔J〕. Environmental Science,2012,33(3):711－719.〕

〔5〕 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望〔J〕. 地球科学进展,2015,30(2):196－213.〔Zhang Qiang,Yao Yubi,Li Yaohui,et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in Northwest China〔J〕. Advances in Earth Science,2015,30(2):196－213.〕

〔6〕 黄锦忠,谭红兵,王若安,等. 我国西北地区多年降水的氢氧同位素分布特征研究〔J〕. 水文,2015,35(1):33－39.〔Huang Jinzhong,Tan Hongbing,Wang Ruo'an,et al. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in Northwest China〔J〕. Hydrology,2015,35(1):33－39.〕

〔7〕 陈曦,姜逢清,王亚俊,等. 亚洲中部干旱区生态地理格局研究〔J〕. 干旱区研究,2013,30(3):385－390.〔Chen Xi,Jiang Fengqing,Wang Yajun,et al. Characteristics of the eco-geographical pattern in arid land of Central Asia〔J〕. Arid Zone Research,2013,30(3):385－390.〕

〔8〕 李永格,李宗省,冯起,等. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义〔J〕. 环境科学,2018,39(6):2 661－2 672.〔Li Yongge,Li Zongsheng,Feng Qi,et al. Environmental significance of the stable isotopes in precipitation at different altitudes in the Taolai River Basin〔J〕. Environmental Science,2018,39(6):2 661－2 672.〕

〔9〕 朱建佳,陈辉,巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源〔J〕. 环境科学,2015,36(8):2 784－2 790.〔Zhu Jianjia,Chen Hui,Gong Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in Easter Qaidam Basin〔J〕. Environmental Science,2015,36(8):2 784－2 790.〕

〔10〕 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展〔J〕. 地理学报,2014,69(9):1 295－1 304.〔Chen Yaning,Li Zhi,Fan Yuting,et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China〔J〕. Acta Geographica Sinica,2014,69(9):1 295－1 304.〕

〔11〕 王涛,霍彦峰,罗艳. 近 300 a 来天山中西部降水与太阳活动的小波分析〔J〕. 干旱区研究,2016,33(4):708－717.〔Wang Tao,Huo Yanfeng,Luo Yan. Precipitation and sunspots in the central-west Tianshan Mountains in recent 300 years〔J〕 Arid Zone Research,2016,33(4):708－717.〕

〔12〕 Wang S J,Zhang M J,Chen F,et al. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid Central Asia〔J〕. Journal of Geographical Sciences,2015,25(7):771－783.

〔13〕 孙从建,张子宇,李捷,等. 青藏高原西北部大气降水稳定同位素时空特征变化〔J〕. 山地学报,2018,36(2):217－228.〔Sun Congjian,Zhang Ziyu,Li Jie,et al. Temporal and spatial characteristics of stable isotopes of atmospheric precipitation in the North-Western Tibetan Plateau〔J〕. Mountain Research,2018,36(2):217－228.〕

〔14〕 胡汝骥. 中国天山自然地理〔M〕. 北京:中国环境科学出版社,2004.〔Hu Ruji. Natural Geography of China's Tianshan Mountains〔M〕. Beijing: China Environmental Science Press,2004.〕

〔15〕 周石硚,中尾正义,坂井亚规子,等. 祁连山七一冰川积雪和大气降水中的氢氧稳定同位素变化〔J〕. 科学通报,2007,52(18):2 187－2 193.〔Zhou Shiqiao,Masayoshi N K,Tsuyoshi A K,et al. Hydrogen and oxygen stable isotope changes in Qiyi Glacier,snow and precipitation in Qilian Mountains〔J〕. Chinese Science Bulletin,2007,52(18):2 187－2 193.〕

〔16〕 陈曦. 中国干旱区自然地理〔M〕. 北京: 科学出版社,2015.〔Chen Xi. Physical Geography of Arid Areas in China〔M〕. Beijing:Science Press,2015.〕

〔17〕 王圣杰,张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素〔J〕. 第四纪研究,2017,37(5):1 119－1 130.〔Wang Shenjie,Zhang Mingjun. Spatio-temporal charcteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan mountains〔J〕. Quaternary Sciences,2017,37(5):1 119－1 130.〕

〔18〕 Wang S J,Zhang M J,Hughes C E,et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions:An observation network in the Tianshan Mountains,Central Asia〔J〕. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology,2016,68(Suppl.):289－299.

〔19〕 赵良菊,尹力,肖洪浪,等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据〔J〕. 科学通报,2011,56(1):58－67.〔Zhao Liangju,Yin Li,Xiao Hongliang,et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin〔J〕. Chinese Science Bulletin,2011,56(1):58－67.〕

〔20〕 Li Z X,Feng Q,Yong S,et al. Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Moutntain,northwestern China〔J〕. Atmospheric Research,2016,182:87－101.

〔21〕 Craig H. Isotopic variations in meteoric waters〔J〕. Science,1961,133(3 465):1 702－1 703.

〔22〕 章新平,姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和雨量之间的关系〔J〕. 冰川冻土,1994,16(1):31－40.〔Zhang Xinping,Yao Tandong. Relations of oxygen isotopic composition in precipitation with temperature and precipitation amount in some regions of China〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,1994,

16(1):31 -40.]

〔23〕 Li Z X, Gao Y, Wang Y M, et al. Can monsoon moisture arrive in the Qilian Mountains in summer? 〔J〕. Quaternary International, 2015, 358:113 -125.

〔24〕 Wu J K, Ding Y J, Ye B, et al. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China〔J〕. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6):1 123 -1 134.

〔25〕 Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region 〔J〕. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 2011, 63(3):352 -359.

〔26〕 Klaus Froehlich, Martin Kralik, Wolfgang Papesch, et al. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions-moisture recycling 〔J〕. Isotopes in Environmental & Health Studies, 2008, 44(1):61.

〔27〕 Gat J R, Mook W G, Meijer H A J. Stable isotopes processes in the water cycle 〔C〕//Mook W G. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle (Principles and Applications), Atmospheric Water. Paris: Unesco and Iaea, 2001:17 -40.

〔28〕 Rozanski K, Araguásaraguás L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate〔J〕. Science, 1992, 258(5 084):981 -985.

〔29〕 Yurtsever Y, Gat J R. Atmospheric waters〔C〕//Gat J R, Gonfiantini R. Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen -18 in the Water Cycle. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1981:103 -142.

〔30〕 孔彦龙. 基于氘盈余的内陆干旱区水汽再循环研究〔D〕. 北京:中国科学院大学, 2013. 〔Kong Yanlong. Quantifying Recycled Moisture Fraction in Precipitation of an Arid Region Using Deuterium Excess 〔D〕. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.〕

Spatial Distribution of Precipitation Stable Isotopes in the Alpine Zones in Central Asia

SUN Cong-jian, ZHANG Zi-yu, CHEN Wei, LI Wei, CHEN Ruo-xia

(*School of Geographical Science*, *Shanxi Normal University*, *Linfen* 041000, *Shanxi*, *China*)

Abstract: As an input factor of water cycle, precipitation is a primary source of surface water and groundwater, especially in arid Central Asia. As a useful tracer, the precipitation isotopic composition has become as an important tool for researching the regional water cycle. In order to reveal the spatial and temporal distribution of precipitation stable isotope in arid area in Central Asia, this paper analyzed the precipitation isotopic composition samples collected from 18 stations in the Tianshan Mountains (Wuqia, Akqi, Shali Guilanke, Shenmuyuan, Bayanbulak, Balguntay, Huangshuigou, Urumqi River Hero Bridge, Barkol and Yiwu), Kunlun Mountains (Sharman, Xihexiu and Jiangka) and Qilian Mountains (Yeniugou, Dayekou, Daiqian, Jinqiangyi and Anyuan) in Central Asia. According to the results, a clearly seasonal variation of the values of precipitation isotopic composition could be observed, and the values were high in summer but low in winter in these three regions. The seasonal fluctuation of the values in the three study regions was significant. The slopes of the atmospheric precipitation equation of the Tianshan Mountains and Qilian Mountains were lower than that of the global one except that of the Kunlun Mountains, which revealed that the regional precipitation in these regions was affected by the strong evaporation. Precipitation at all the stations was mainly affected by temperature. The values of precipitation $\delta^{18}O$ at the three stations in the Kunlun Mountains in spring and summer was obviously affected by altitude, and they were decreased with the increase of altitude but affected slightly in other regions. The d values of the alpine zones in Central Asia were holistically high in winter but low in summer expect at Xihexiu Station in the Kunlun Mountains.

Key words: alpine zone; precipitation; stable isotope; spatiotemporal distribution; Central Asia